第39卷 第2期
2022年3月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 39 No. 2
Mar. 2022

香日德-柴达木河流域土壤湿度时空变化特征及其影响因素

程梦园[1,2,3]， 曹广超[2,3,4]， 赵美亮[1,2,3]， 刁二龙[1,2,3]， 何启欣[1,2,3]，
高斯远[1,2,3]， 邱巡巡[1,2,3]， 程 国[1,2,3]

（1. 青海师范大学地理科学学院，青海 西宁 810008；2. 青海省自然地理与环境过程重点实验室，青海 西宁 810008；3. 青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室，青海 西宁 810008；4. 青海省人民政府-北京师范大学高原科学与可持续发展研究院，青海 西宁 810008）

摘 要：土壤湿度作为生态环境的关键因子，是土壤监测和生态环境变化的重要指标。本研究基于MOD11A2 LST和MOD13A2 NDVI数据，通过温度干旱植被指数TVDI（Temperature Vegetation Dryness Index）、相关性分析和区域统计分析等数理统计分析方法对香日德-柴达木河流域植被生长季的土壤湿度时空分布特征及其影响因素进行分析。结果表明：（1）香日德-柴达木河流域2005年、2010年、2015年和2020年植被生长季TVDI平均值为0.61，最大值为2015年（0.64），最小值为2020年（0.58），年际TVDI值缓慢下降，但在2015年出现上升现象，研究区旱情不稳定且长期处于干旱等级。（2）不同等级土壤湿度的面积从大到小依次为干旱>极干旱>正常>湿润>极湿润，分别占研究区总面积的30.63%、25.77%、22.16%、16.44%、5.01%。（3）TVDI在空间分布上呈现出由西北向东南逐渐递减的趋势，具有明显的区域差异性。（4）TVDI值与海拔呈负相关关系，海拔每升高500 m，TVDI值减少0.11，TVDI值与平均气温呈正相关关系，与坡度和降水量之间不存在明显的相关性关系。

关键词：土壤湿度；温度植被干旱指数；相关性分析；香日德-柴达木河流域

土壤湿度是陆地表面水循环系统的重要组成部分，在地表能量平衡中起着至关重要的调节作用，是气象、水文、农业等领域研究的重要指标[1-2]。目前获取土壤湿度信息的方法主要有两种[3]。一是田间实测法，利用地面观测站或野外采样直接测量土壤湿度值，该方法具有数据精度高的优点，但仅代表观测站或采样点局部区域的土壤湿度信息，不宜应用于大范围测量，具有局限性[4]。二是利用多源遥感技术，通过遥感反演快速获取大范围、空间连续的土壤湿度信息，是当前监测土壤湿度的主要方法[5]。遥感反演土壤湿度的方法主要有热惯量法、微波遥感法和植被指数法[6]。Waston等[7]首次利用热惯量模型估测土壤湿度，但该方法对日较差数据有较高精度要求，在数据收集上有一定的困难。微波遥感主要分为主动遥感和被动遥感[8]，微波遥感法监测精度高，但受植被覆盖及地表粗糙度的影响较大。植被指数法通过获取植被光谱特征从而间接反映出土壤湿度情况[9]，例如运用NDVI-LST光谱特征空间，可以对土壤干旱进行精确监测[10]。刘一哲等[11]运用模糊数学和TVDI法和对藏北地区的春夏旱情动态进行监测，结果表明该方法可为藏北地区干旱监测提供数据支撑。Cao等[12]利用TVDI法对蒙古高原干旱时空变化进行了研究，认为在1982—2018年蒙古高原普遍存在干旱现象，且干旱化对生态系统分布、生物多样性等均有影响。众多研究表明运用TVDI法反演土壤湿度在高原地区具有较好的适用性。

香日德-柴达木河流域地处高海拔内陆盆地，水资源相对匮乏，由于特殊的地理位置和干旱气候的影响，流域内植被稀疏，覆盖度低，土壤风蚀、盐渍化严重，是典型的脆弱生态系统[13]。流域内大量的地表径流用于灌溉，导致下游生态环境恶化，流

收稿日期：2021-07-13； **修订日期**：2021-09-15
基金项目：青海省重大科技专项(2019-SF-A4-3)；青海省创新平台建设专项青海省自然地理与环境过程重点实验室项目(2020-ZJ-Y06)
作者简介：程梦园(1997-)，女，硕士研究生，主要从事遥感与地理信息系统应用研究. E-mail: chengmengyuan2527@163.com
通讯作者：曹广超. E-mail: caoguangchao@126.com

域整体抗旱能力不强。香日德-柴达木河流域是柴达木盆地重要的粮食作物和油料作物产区[14]，而土壤湿度是影响当地农牧业生产的关键因素，也是农作物估产及旱情监测的重要指标。但研究区气象站点稀少，缺少长时间、大范围的土壤湿度观测数据，难以通过观测数据获得土壤湿度相关信息。目前尚未有利用TVDI法对该流域进行干旱状况变化趋势的研究。基于此，本研究应用MODIS数据构建Ts-NDVI特征空间计算出TVDI，得到香日德-柴达木河流域2005年、2010年、2015年和2020年植被生长季土壤湿度的时空变化特征，并探讨其与地形和气象因素的关系，为香日德-柴达木流域农牧业生产、水资源合理利用、生态工程建设以及生态环境保护规划提供一定的参考。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

香日德-柴达木河流域位于青海省海西蒙古族藏族自治州，柴达木盆地东南部，地势东南高西北低，流域内有盆地和山区两种地貌类型，南部高山连绵，平均海拔在4000 m以上，西北部为冲积平原，平均海拔在2900~3100 m[15]，属于大陆性气候，日照充足，昼夜温差大，年均降水量少，蒸发强烈，流域多年平均气温在3.1~4.4 ℃，多年均降水量262.18 mm，年蒸散发量为2525.3 mm（图1）。流域东南部为山区，以草地为主，主要有紫花针茅草原、芦苇草甸和小叶金露梅灌丛等，农田和建设用地位于山区边缘，中部和西北部则多为裸地，主要有盐沼和蒿叶猪毛菜砾漠等[16]。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 遥感数据 遥感数据选用NASA（https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/）下载的MODIS数据产品，时间范围为2005年、2010年、2015年和2020年植被生长季（5—9月），空间分辨率均为1 km，时间分辨率为8 d的MOD11A2 LST产品数据和16 d的MOD13A2 NDVI产品数据。DEM数据来源于地理空间数据云（http://www.gscloud.cn）SRTMDEMUTM 90 m数字高程数据。

1.2.2 气象数据 气象数据选用2005年、2010年、2015年香日德-柴达木河流域内的都兰和诺木洪，及其周边的乌兰、茶卡和玛多5个气象站点的逐日平均气温和降水数据，数据来源于中国气象数据网（http://data.cma.cn/）。

1.2.3 数据预处理 使用MRT软件分别对MOD11A2 LST和MOD13A2 NDVI数据进行镶嵌、重投影以及格式转换等处理，并使用ENVI软件将LST和NDVI数据进行了数据复原得到其真实值，最后在ArcGIS软件中裁剪出研究区的LST和NDVI的栅格影像数据。为便于后续研究，在ArcGIS软件中将DEM数据重采样到1 km。

1.3 研究方法

1.3.1 温度干旱植被指数 土壤湿度变化受气温、植被生长状况、土壤性质等众多因素影响，其间存在一系列复杂的交互作用[17]。Sandholt等通过研究发现，植被指数与地表温度间呈明显的负相关关系，故将植被指数和地表温度相结合构建Ts-NDVI特征空间，并提出了温度植被干旱指数TVDI用来估测土壤湿度，根据Ts-NDVI特征空间，可以定义TVDI的表达式为[18]：

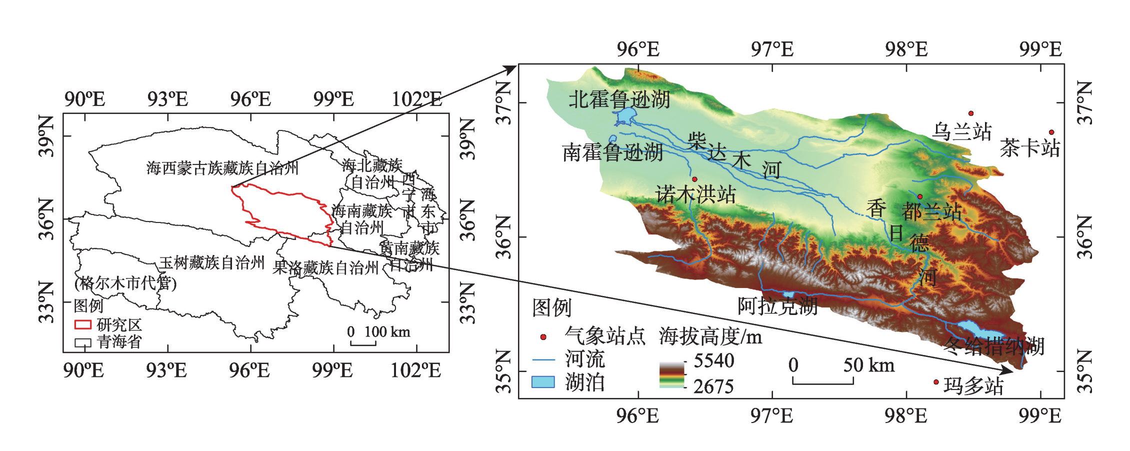


图1 香日德-柴达木河流域位置示意图

Fig. 1 Location of Xiangride-Qaidam River Basin

$$\mathrm{TVDI}=\frac{Ts-Ts_{\min}}{Ts_{\max}-Ts_{\min}} \quad (1)$$

式中：Ts为任意像元的地表温度；$Ts_{\max}$、$Ts_{\min}$分别为最高地表温度、最低地表温度。TVDI取值为0~1，TVDI值越接近0表示该像元越湿润，TVDI值越接近1则表示该像元越干旱。

1.3.2　干湿边方程拟合　以NDVI值为横坐标、相同时相的LST值为纵坐标，对$Ts_{\max}$和$Ts_{\min}$与NDVI进行线性拟合，由于植被覆盖度会影响NDVI值的变化，NDVI值过高或过低都会对土壤湿度监测结果产生影响，故在拟合干湿边方程时NDVI有效值选择在0.2~0.8范围内，计算公式为[19-20]：

$$Ts_{\max}=a_2+b_2\times \mathrm{NDVI} \quad (2)$$

$$Ts_{\min}=a_1+b_1\times \mathrm{NDVI} \quad (3)$$

式中：a_1、b_1为湿边拟合方程的系数，a_2、b_2为干边拟合方程的系数。

1.3.3　相关性分析　为研究香日德–柴达木河流域TVDI值与其他因子间的关系，采用Pearson相关系数，该相关系数可以检验两个变量因子之间的相关性，在气象、水文及生态环境等领域中得到了广泛的应用。其计算公式为[21]：

$$R_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)\left(y_i-\bar{y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\bar{y}\right)^2}} \quad (4)$$

式中：R_{xy}为相关系数，其取值范围在[−1，1]之间；n为样本量；x_i和y_i分别为x和y第i月的某像元值；$\bar{x}$和$\bar{y}$分别为x和y第i月的平均值。当$R>0$表示呈现正相关，$R<0$则表示呈现负相关，其绝对值越大表示相关性越显著。

2　结果与分析

2.1　干湿边方程拟合结果

通过建立香日德–柴达木河流域Ts-NDVI特征空间，从2005年、2010年、2015年和2020年6月的Ts-NDVI特征空间图可知（图2），各年干湿边方程拟

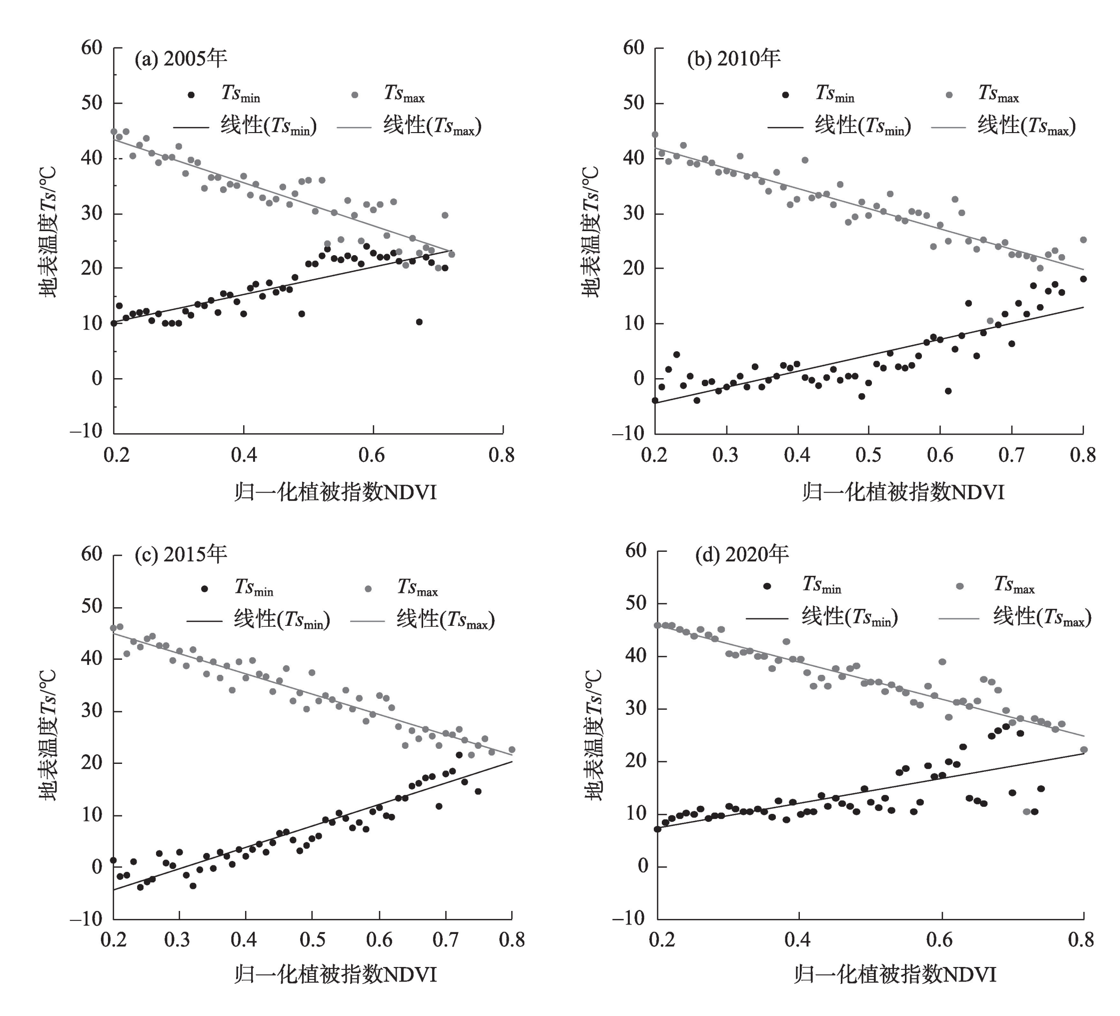


图2　2005年、2010年、2015和2020年6月的Ts-NDVI特征空间

Fig. 2　The Ts-NDVI feature space in June 2005, 2010, 2015 and 2020

合结果表现出的特征都较为相似,均呈现出三角形或梯形,这与王汉文等[22]和杨茹等[23]对干湿边方程拟合的研究结果一致。NDVI值增大干边上的地表最大温度随之减少,呈现线性关系,湿边上的地表最小温度随之增大但不稳定。

从香日德-柴达木河流域2005年、2010年、2015年和2020年植被生长季的干、湿边方程来看(表1),NDVI与Ts_{max}的干边方程斜率均为负,呈现出负相关关系,R^2除2005年5月为0.67之外,其余时相的R^2在0.75~0.93,拟合效果较好。而NDVI与Ts_{min}的湿边方程的相关性则较弱,表明研究区NDVI与Ts_{min}之间的关系不稳定。

2.2 香日德-柴达木河流域植被生长季TVDI时空格局

TVDI是反映土壤干湿状况的替代指标,只能估算表层土壤湿度,反映其空间分布状况[24]。本研究根据吴英杰等[25]对土壤湿度的分级方法将TVDI值划分为5个等级,分别为极湿润(0≤TVDI<0.2)、湿润(0.2≤TVDI<0.4)、正常(0.4≤TVDI<0.6)、干旱(0.6≤TVDI<0.8)、极干旱(0.8≤TVDI<1)。

根据2005年、2010年、2015年和2020年TVDI值可知(表2),香日德-柴达木河流域TVDI多年均值为0.61,最大值为2015年(0.64),最小值为2020年(0.58),年际TVDI值缓慢下降,但在2015年出现上升现象,流域旱情不稳定且土壤湿度长期处于干旱(0.6≤TVDI<0.8)等级。植被生长季TVDI月均值,由大到小依次为7月(0.66)>8月(0.64)>6月(0.63)>9月(0.57)>5月(0.54),出现该现象的主要原因是,6—8月研究区太阳辐射强烈、气温达到全年最大值、植被生长所需水分也达到最大,导致土壤含水量降低,土壤湿度减小。从2005年、2010年、2015年和2020年TVDI分级结果面积统计来看(图

表1 香日德柴达木河流域2005年、2010年、2015年和2020年植被生长季干、湿边方程

Tab. 1 The dry and wet edge equations in the Xiangride-Qaidam River basin growing season in 2005, 2010, 2015 and 2020

日期/年-月	干边方程	湿边方程
2005-05	$y=-52.4066x+325.323$ ($R^2=0.67$)	$y=33.4943x+272.560$ ($R^2=0.26$)
2005-06	$y=-37.8626x+323.323$ ($R^2=0.85$)	$y=25.0348x+278.239$ ($R^2=0.65$)
2005-07	$y=-32.2040x+325.900$ ($R^2=0.84$)	$y=25.7602x+270.864$ ($R^2=0.78$)
2005-08	$y=-34.9882x+321.051$ ($R^2=0.90$)	$y=19.6983x+275.720$ ($R^2=0.78$)
2005-09	$y=-64.4123x+319.680$ ($R^2=0.83$)	$y=31.7887x+264.923$ ($R^2=0.69$)
2010-05	$y=-54.7465x+322.947$ ($R^2=0.88$)	$y=9.75978x+281.279$ ($R^2=0.05$)
2010-06	$y=-35.1560x+321.496$ ($R^2=0.91$)	$y=30.8990x+262.305$ ($R^2=0.67$)
2010-07	$y=-31.6394x+328.951$ ($R^2=0.87$)	$y=11.9408x+287.259$ ($R^2=0.42$)
2010-08	$y=-28.3611x+315.728$ ($R^2=0.90$)	$y=12.2574x+280.724$ ($R^2=0.50$)
2010-09	$y=-48.1733x+313.477$ ($R^2=0.82$)	$y=22.8277x+269.387$ ($R^2=0.74$)
2015-05	$y=-74.4990x+329.596$ ($R^2=0.81$)	$y=52.4601x+263.142$ ($R^2=0.69$)
2015-06	$y=-40.6154x+326.026$ ($R^2=0.92$)	$y=40.5084x+260.587$ ($R^2=0.89$)
2015-07	$y=-25.4209x+324.712$ ($R^2=0.88$)	$y=20.5190x+284.490$ ($R^2=0.55$)
2015-08	$y=-33.8357x+323.004$ ($R^2=0.75$)	$y=23.2733x+278.474$ ($R^2=0.55$)
2015-09	$y=-40.7949x+312.469$ ($R^2=0.83$)	$y=23.3449x+276.902$ ($R^2=0.34$)
2020-05	$y=-74.9227x+329.098$ ($R^2=0.86$)	$y=22.6295x+272.789$ ($R^2=0.12$)
2020-06	$y=-32.8359x+324.519$ ($R^2=0.85$)	$y=20.9803x+275.909$ ($R^2=0.44$)
2020-07	$y=-36.4775x+329.062$ ($R^2=0.93$)	$y=13.3870x+279.855$ ($R^2=0.39$)
2020-08	$y=-38.1032x+324.959$ ($R^2=0.88$)	$y=11.6917x+282.224$ ($R^2=0.48$)
2020-09	$y=-42.4479x+314.101$ ($R^2=0.87$)	$y=16.5646x+278.758$ ($R^2=0.25$)

表2 2005年、2010年、2015年和2020年TVDI值

Tab. 2 TVDI value in 2005, 2010, 2015 and 2020

年份	月份					
	5月	6月	7月	8月	9月	生长季平均值
2005	0.54	0.65	0.66	0.64	0.57	0.61
2010	0.54	0.65	0.65	0.66	0.54	0.61
2015	0.59	0.62	0.73	0.67	0.59	0.64
2020	0.51	0.62	0.62	0.59	0.58	0.58

3),香日德-柴达木河流域土壤湿度不同等级面积从大到小为干旱>极干旱>正常>湿润>极湿润,约占研究区总面积的30.63%、25.77%、22.16%、16.44%、5.01%。

通过香日德-柴达木河流域植被生长季TVDI反演结果图可以看出(图4),流域TVDI值整体上呈现出由东南向西北逐渐增高的趋势,西北部以干旱和极干旱等级为主,东南部正常和湿润等级占比相对较高,具有明显的区域差异性。TVDI高值区主要分布于河流下游的冲积平原,此区域多为荒漠,整体植被覆盖度低[26],降雨稀少,不利于土壤水分储存。TVDI低值区主要位于河流上游地区及诺木洪一带,该区域有冬给措纳湖、阿拉克湖以及较多河流分布,植被覆盖度相对较高,土壤湿度较大。在2005—2020年的5月主要由极干旱等级转换为干旱等级,极干旱等级的面积从2005年的8355.98 km^2(占比19.01%)减少到2020年的1345.4 km^2(占比3.07%);6月变化最明显的是东南部和西南部的干旱等级转换为正常等级,干旱等级的面积从2005年的9041.1 km^2(占比20.56%)减少到2020年的5461.29 km^2(占比12.42%);7月和8月北霍鲁逊湖以东大部分区域极干旱面积减少,7月极干旱等级面积由2005年的16181.04 km^2(占比36.83%)减少到2020年的13059.71 km^2(占比29.72%)。8月极干旱等级面积由2005年的14129.82 km^2(占比32.13%)减少到2020年的10358.56 km^2(占比23.57%);9月南霍鲁逊湖周围区域及都兰县以南部分区域正常面积增加,由2005年的7756.06 km^2(占比17.63%)增加到2020年的12375.03 km^2(占比28.1%)。说明研究区植被生长季的土壤湿度状况在由极干旱等级向干旱和正常等级转变。

2.3 土壤湿度影响因素分析

2.3.1 地形因子　海拔和坡度是TVDI的重要影响因子,香日德-柴达木河流域海拔相对高差及坡度变化较大。本研究根据钟祥浩等[27]提出的山地海拔类型分级指标,基于DEM数据进行对海拔进行分

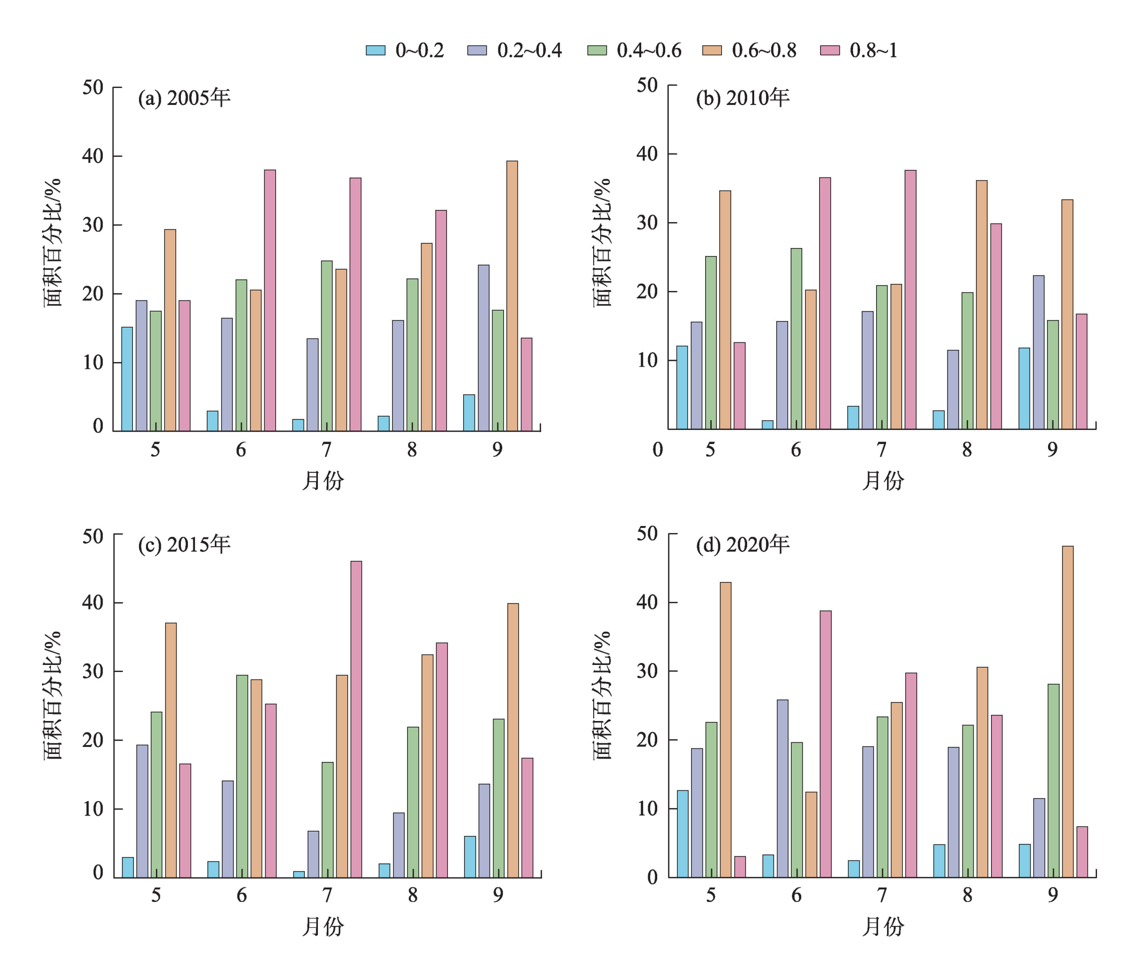
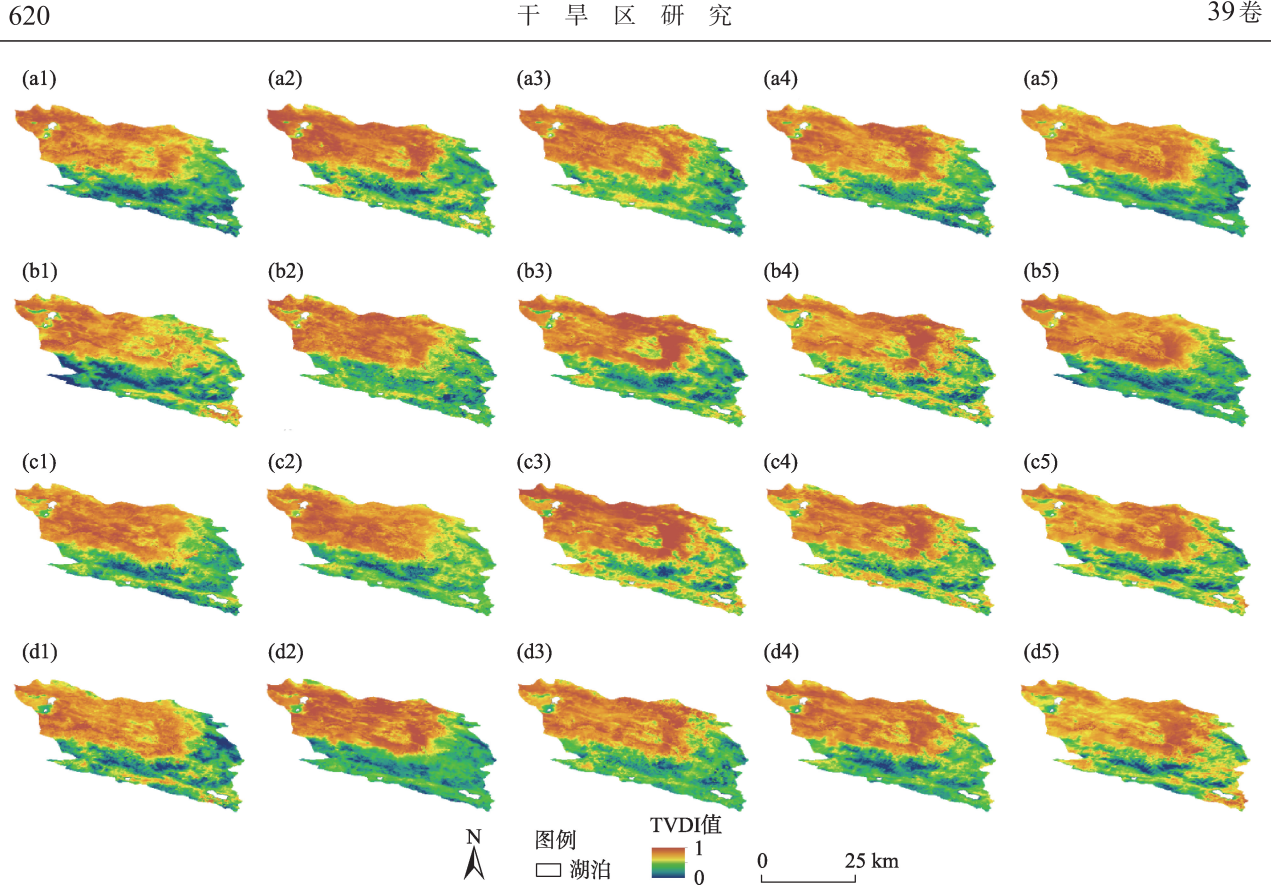


图3　2005年、2010年、2015年和2020年TVDI分级结果面积占比

Fig. 3　Area share of TVDI classification results in 2005, 2010, 2015 and 2020



注:a1~a5为2005年5—9月;b1~b5为2010年5—9月;c1~c5为2015年5—9月;d1~d5为2020年5—9月。

图4 香日德-柴达木河流域植被生长季TVDI反演结果

Fig. 4 TVDI inversion results of vegetation growing season in Xiangride-Qaidam River Basin

级,发现研究区地貌类型以高中山(2500~3500 m)和高山(3500~5500 m)为主,随海拔的升高TVDI值呈逐渐减小的趋势,高中山的土壤湿度高于高山,进一步将海拔以500 m为间隔划分为6个区间,各海拔区间与多年TVDI平均值进行区域统计分析和相关性分析,结果表明TVDI与海拔呈显著负相关关系(P<0.01),海拔每升高500 m,TVDI值减少0.11(图5)。

依据国际地理学会地貌调查与制图专业委员会提出的坡度划分标准,将香日德-柴达木河流域

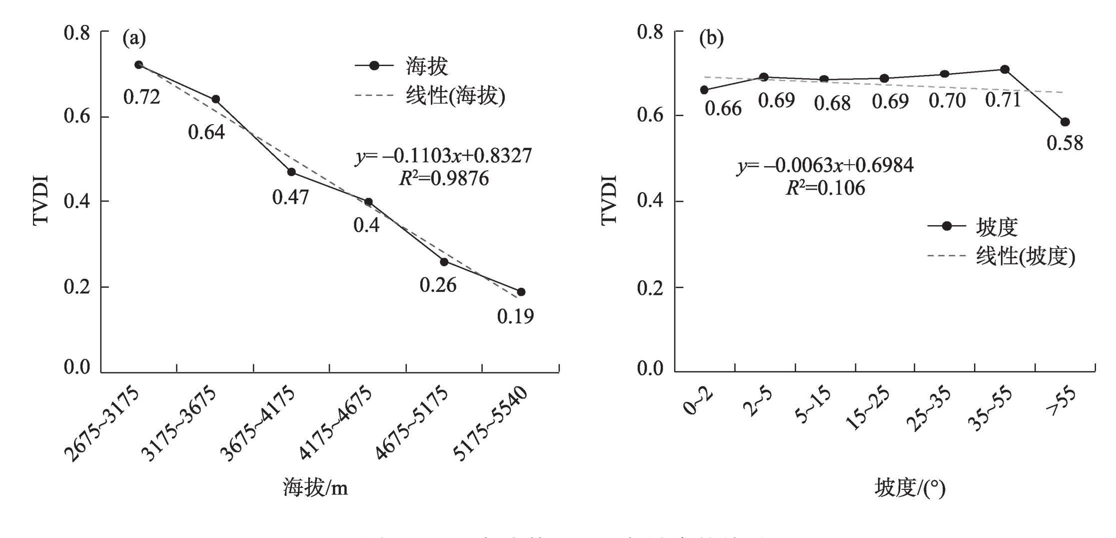


图5 TVDI与海拔、TVDI与坡度的关系

Fig. 5 The relationship between TVDI and altitude, TVDI and slope

坡度划分为平原至微斜坡(0°~2°)、缓斜坡(2°~5°)、斜坡(5°~15°)、陡坡(15°~25°)、急坡(25°~35°)、急陡坡(35°~55°)、垂直坡(大于55°)7个区间,TVDI在急陡坡值最大,在垂直坡值最小,整体上变化不明显。由于海拔高度直接影响地形地貌和水热条件,同时随着海拔增加,冰雪冻融作用对土壤湿度的影响增强,植被覆盖度增加,使得土壤湿度增加。

2.3.2 气象因子 香日德-柴达木河流域属典型的高原大陆性气候区,气候严寒,降水在地区分布上极不均匀,降水量由东部向西部、由四周山区向盆地中心递减。通过将2005年、2010年、2015年植被生长季各气象站点的平均气温、累积降水量数据与同月份的TVDI平均值进行相关性分析发现,平均气温与TVDI值均呈现出正相关关系($P<0.01$),R^2值均在0.7以上。通过对比香日德-柴达木河流域平均气温与TVDI的关系(图6),发现各站点植被生长季平均气温与TVDI平均值的月际变化趋势相似,说明研究区内随着温度的升高地表蒸发量增加,TVDI值也随之升高,土壤湿度减小。在累积降水量与同月份TVDI平均值的相关性分析中发现,累积降水量与TVDI之间不存在明显的相关性关系(R^2在0.09~0.467),这与研究区地形复杂、气象站点少、降水量少等因素有关,未能很好的反应出流域整体的降水情况。总的来说,香日德-柴达木河流域TVDI值的变化与当地气温变化密切相关,气温是影响香日德-柴达木河流域土壤干湿状况的重要因子,而降水对其的影响不显著。

3 讨 论

本研究基于TVDI对香日德-柴达木河流域的土壤湿度进行反演,通过本项研究对该流域的土壤湿度变化情况有了直观的认识。流域土壤湿度状况在空间上变化较小,干旱和极干旱区集中在流域西北部的荒漠地区,结合研究区地理条件可推断出植被覆盖度和地形可能对其具有主导影响。在时间上,研究区6—8月的TVDI均值较高,究其原因是该时间段内流域日照时数长、气温上升、植被生长所需水分增加。在土壤湿度影响因素方面,本研究利用相关性分析,探究海拔、坡度、气温和降水对土壤湿度的影响作用,发现海拔和气温是影响该地区土壤湿度变化的重要因素,这与覃艺等[28]对内蒙古干旱影响因子分析中对海拔和气温与TVDI值关系的分析结果相一致,但在本研究中降水与TVDI的相关性不显著,出现此现象的原因可能是该流域地处我国西北干旱区,流域植被覆盖度低,蒸发强烈、降水量少,且降水对TVDI的影响具有一定的滞后性[24],这与李彩瑛等[24]基于TVDI对羌塘高原土壤湿度变化分析中降水量与TVDI值不具有显著相关性的结果相一致。本研究对香日德-柴达木河流域的土壤湿度状况的研究仅限于植被生长季,同时在土壤湿度影响因素方面只考虑了4种,因此在以后

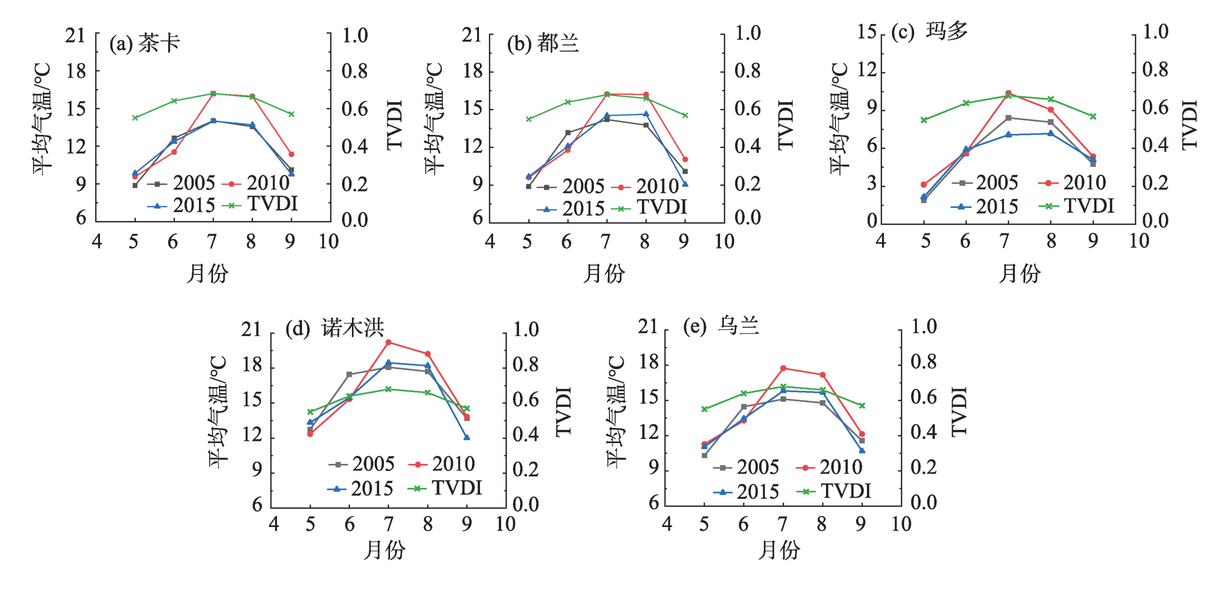


图6 香日德-柴达木河流域平均气温与TVDI的关系

Fig. 6 Relations between average temperature and TVDI in Xiangride-Qaidam River Basin

的相关研究工作中需对时间尺度进行扩展,并结合NPP、蒸散发、人为因素等多方面进行分析。

4 结 论

(1) 使用MODIS数据反演香日德-柴达木河流域植被生长季土壤湿度效果较好,表明通过MOD11和MOD13数据反演的TVDI指数可用于该流域土壤湿度监测。

(2) 香日德-柴达木河流域土壤湿度整体上以干旱为主,植被生长季TVDI最大值在7月,最小值在5月,具有一定的周期性变化,年际TVDI缓慢下降,说明干旱程度有所减轻。TVDI的空间分布表现为西北部和中部较干旱,东南部较湿润,流域土壤湿度存在明显的区域差异性。

(3) 从TVDI与地形和气象因子的相关性分析可以看出,TVDI与海拔呈现负相关关系、与平均气温呈现出正相关关系、与坡度和降水的相关性不高,表明香日德-柴达木河流域土壤湿度受海拔和气温的影响最为显著。

参考文献(References):

[1] 李海霞, 杨井, 陈亚宁, 等. 基于MODIS数据的新疆地区土壤湿度反演[J]. 草业学报, 2017, 26(6): 16−27. [Li Haixia, Yang Jing, Chen Yaning, et al. Retrieval of soil moisture information in Xinjiang using MODIS[J]. Journal of Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(6): 16−27.]

[2] 邓雅文, 凌子燕, 孙娜, 等. 基于广义回归神经网络的京津冀地区土壤湿度遥感逐日估算研究[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(4): 749−761. [Deng Yawen, Ling Ziyan, Sun Na, et al. Daily estimation of soil moisture over Beijing-Tianjin-Hebei Region based on General Regression Neural Network Model[J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(4): 749−761.]

[3] 王娜, 易桂花, 张廷斌, 等. 基于TVDI的青藏高原腹地生长季土壤湿度时空变化及其气候响应[J]. 草业科学, 2020, 37(11): 2185−2197. [Wang Na, Yi Guihua, Zhang Tingbin et al. Spatio-temporal and climate-related variations in soil moisture during the growing season in the hinterland of the Qinghai-Tibet Plateau: An analysis using the temperature-vegetation dryness index[J]. Prataculturall Science, 2020, 37(11): 2185−2197.]

[4] 王佳新, 萨楚拉, 毛克彪, 等. 蒙古高原土壤湿度时空变化格局及其对气候变化的响应[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(1): 231−239. [Wang Jiaxin, Sa Chula, Mao Kebiao, et al. Temporal and spatial variation of soil moisture in the Mongolian Plateau and its response to climate change[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021, 33(1): 231−239.]

[5] 杨玲, 杨艳昭. 基于TVDI的西辽河流域土壤湿度时空格局及其影响因素[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(2): 76−81. [Yang Ling, Yang Yanzhao. The spatial and temporal pattern of soil moisture in the west Liaohe river basin based on TVDI method and its influencing factors[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(2): 76−81.]

[6] 聂艳, 马泽玥, 周逍峰, 等. 阿克苏河流域土壤湿度反演与监测研究[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5138−5148. [Nie Yan, Ma Zeyue, Zhou Xiaofeng, et al. Soil moisture retrieval and monitoring in the Aksu River basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): 5138−5148.]

[7] Waston K, Pohn H A. Thermal interia mapping from satellite discrimination of geology unit in Oman[J]. Journal of Research of the U. S. Geological Survey, 1974, 2(2): 147−158.

[8] 王静, 方锋, 黄鹏程, 等. AMSR-E土壤水分产品评价及在干旱监测中的应用[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 650−664. [Wang Jing, Fang Feng, Huang Pengcheng, et al. Evaluation of advanced microwave scanning radiometer for EOS(AMSR-E) soil moisture products over China and its application in drought monitoring[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 650−664.]

[9] 李占杰, 陈基培, 刘艳民, 等. 土壤水分遥感反演研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(3): 474−481. [Li Zhanjie, Chen Jipei, Liu Yanmin, et al. Soil moisture retrieval from remote sensing[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2020, 56(3): 474−481.]

[10] 李毅, 陈新国, 赵会超, 等. 土壤干旱遥感监测的最新研究进展[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(1): 1−7. [Li Yi, Chen Xinguo, Zhao Huichao, et al. Latest advances of soil drought and its monitoring based on remote sensing[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2021, 19(1): 1−7.]

[11] 刘一哲, 冯文兰, 扎西央宗, 等. 基于MODIS TVDI和模糊数学方法的藏北地区旱情等级遥感监测[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 86−96. [Liu Yizhe, Feng Wenlan, Zhaxi Yangzong, et al. Remote sensing monitoring of drought level in north Tibet based on MODIS TVDI and Fuzzy Mathematics[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 86−96.]

[12] Cao Xiaoming, Feng Yixing, Shi Zhongjie. Spatio-temporal variations in drought with remote sensing from the Mongolian Plateau during 1982−2018[J]. Chinese Geographical Science, 2020, 30(6): 1081−1094.

[13] 毛军. 柴达木盆地香日德绿洲灌溉对地下水的影响及生态响应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007. [Mao Jun. Study on the Impact of Irrigation on Groundwater and its Ecological Response of Xiangride Oasis in Qaidum Basin[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007.]

[14] 王发科, 雷玉红, 都占良, 等. 气候变化对柴达木盆地主要农作物产量的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(14): 107−112. [Wang Fake, Lei Yuhong, Du Zhanliang, et al. Climate change affects ma-

jor crops' yield in Qaidam Basin[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(14): 107-112.]

[15] 张家好. 香日德-诺木洪山前平原地区地下水资源评价[D]. 北京: 中国地质大学, 2013. [Zhang Jiahao. Groundwater Resource Evaluation of Xiangride- Nuomuhong Piedmont Plain[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.]

[16] 朱明帮. 基于3S技术的都兰县土地利用变化及枸杞地光谱识别研究[D]. 青海: 青海大学, 2017. [Zhu Mingbang. Study on Land Use Change and Spectral Recognition of *Lycium barbarum* L. Area Based on "3S" Technique in Dulan County[D]. Qinghai: Qinghai University, 2017.]

[17] 肖洋, 张翔, 朱才荣, 等. 土壤湿度动态变化研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2014, 56(12): 9-12, 16. [Xiao Yang, Zhang Xiang, Zhu Cairong, et al. Research on the dynamics of soil moisture[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014, 56(12): 9-12, 16.]

[18] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2): 213-224.

[19] 高雅, 王晓飞, 高懋芳, 等. 基于温度植被干旱指数的曲靖市干旱监测研究[J]. 中国农学通报, 2020, 36(9): 37-45. [Gao Ya, Wang Xiaofei, Gao Maofang, et al. Drought monitoring in Qujing based on temperature vegetation drought index[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(9): 37-45.]

[20] 叶伟林, 周自强, 石三娥, 等. 基于TVDI的甘肃黑方台土壤湿度分布及影响因素分析[J]. 甘肃科学学报, 2020, 32(6): 50-58. [Ye Weilin, Zhou Ziqiang, Shi San'e, et al. Analysis of spatio-temporal distribution of soil moisture and influencing factors in Heifangtai area based on TVDI[J]. Journal of Gansu Sciences, 2020, 32(6): 50-58.]

[21] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2002. [Xu Jianhua. Mathematical Modem Geography[M]. 2th Ed. Beijing: Higher Education Press, 2002.]

[22] 王汉文, 原喜忠, 雷胜友, 等. 基于TVDI的不同土地类型土壤湿度趋势研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2020, 39(5): 50-60. [Wang Hanwen, Yuan Xizhong, Lei Shengyou, et al. Study on soil moisture trend of different land types based on TVDI[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2020, 39(5): 50-60.]

[23] 杨茹, 高超, 查芊郁, 等. 不同植被指数在基于TVDI方法反演土壤水分中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(2): 33-37. [Yang Ru, Gao Chao, Zha Qianyu, et al. Application of different vegetation indexes in soil moisture inversion based on TVDI[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2020, 43(2): 33-37.]

[24] 李彩瑛, 阎建忠, 刘林山, 等. 基于TVDI的羌塘高原夏季土壤湿度变化分析[J]. 地理研究, 2017, 36(11): 2101-2111. [Li Caiying, Yan Jianzhong, Liu Linshan, et al. Analysis of soil moisture variation in summer of Qiangtang Plateau based on TVDI[J]. Geographical Research, 2017, 36(11): 2101-2111.]

[25] 吴英杰, 全强, 陈晓俊, 等. 2000—2018年锡林郭勒地区干旱时空变化及其气候响应[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1289-1297. [Wu Yingjie, Quan Qiang, Chen Xiaojun, et al. Temporal and spatial variations of drought and climatic response in the Xilingol grassland from 2000 to 2018[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5): 1289-1297.]

[26] 张斯琦. 2000—2015年柴达木盆地植被覆盖度时空变化及其与环境因子的关系[D]. 河北: 河北师范大学, 2019. [Zhang Siqi. Spatial and Temporal Variation of Fractional Vegetation Cover and Its Relationship with Environmental Factors in Qaidam Basin during 2000-2015[D]. Hebei: Hebei Normal University, 2019.]

[27] 钟祥浩, 刘淑珍. 中国山地分类研究[J]. 山地学报, 2014, 32(2): 129-140. [Zhong Xianghao, Liu Shuzhen. Research on the mountain classification in China[J]. Mountain Research, 2014, 32(2): 129-140.]

[28] 覃艺, 张廷斌, 易桂花, 等. 2000年以来内蒙古生长季旱情变化遥感监测及其影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2021, 36(2): 459-475. [Qin Yi, Zhang Tingbin, Yi Guihua, et al. Remote sensing monitoring and analysis of influencing factors of drought in Inner Mongolia growing season since 2000[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(2): 459-475.]

Temporal and spatial variation characteristics and influencial factors of soil moisture in the Xiangride-Qaidam River Basin

CHENG Mengyuan[1,2,3], CAO Guangchao[2,3,4], ZHAO Meiliang[1,2,3], DIAO Erlong[1,2,3], HE Qixin[1,2,3], GAO Siyuan[1,2,3], QIU Xunxun[1,2,3], CHENG Guo[1,2,3]

(1. College of Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, Qinghai, China; 2. Qinghai Province Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, Xining 810008, Qinghai, China; 3. Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation, Ministry of Education, Xining 810008, Qinghai, China; 4. Academy of Plateau Science and Sustainability, People's Government of Qinghai Province & Beijing Normal University, Xining 810008, Qinghai, China)

Abstract: As a key factor of the ecological environment, soil moisture is an important indicator for soil monitoring and changes to the ecological environment. This study is based on MOD11A2 LST and MOD13A2 NDVI data, and used mathematical statistical analysis methods, including the temperature-vegetation dryness index (TVDI), correlation analysis, and regional statistical analysis. The temporal and spatial distribution of humidity characteristics and its influencing factors were analyzed. The average TVDI value in the vegetation growing season of the Xiangride-Qaidam River basin from 2005 to 2020 was 0.61; the maximum value was noted in 2015 (0.64) and the minimum value occurred in 2020 (0.58). The interannual TVDI value slowly decreased over time; however, it did increase in 2015. The drought situation in the study area was unstable, and remained at a drought level for an extended time period. The area corresponding to different soil moisture levels, in descending order, was as follows: drought > extremely arid > normal > humid > extremely humid, accounting for 30.63%, 25.77%, 22.16%, 16.44%, and 5.01% of the total area, respectively. The spatial distribution of TVDI gradually decreased from northwest to southeast, with obvious regional differences. Moreover, the TVDI value had a negative correlation with altitude, decreasing by 0.11 for every 500 m increase in altitude. The TVDI was positively correlated with the average temperature, but had no obvious correlation with precipitation.

Keywords: soil moisture; temperature vegetation drought index; correlation analysis; Xiangride-Qaidam River Basin